

Guia de estudos “Astrofísica Estelar para o Ensino Médio”

Capítulo 7 – Tipos espectrais e o diagrama HR

7.1 A classificação espectral

Vimos no Capítulo 1 que os primeiros passos na direção de estabelecer uma classificação das estrelas segundo os seus espectros foram dados pelo padre italiano Angelo Secchi, no Observatório do Vaticano, entre 1863 e 1868. Nesse último ano, Secchi resumiu seu trabalho, estabelecendo quatro tipos básicos de espectros: o Tipo I correspondia a estrelas brancas, como Sirius ou Vega, e apresentava linhas fortes de hidrogênio (a série de Balmer); o Tipo II, a estrelas amarelas e alaranjadas, como o Sol ou Arcturus, com linhas fortes de metais, como sódio, cálcio e ferro; o Tipo III, característico de estrelas vermelhas como Antares, que mostrava bandas (conjuntos) de linhas finas (posteriormente identificadas como moléculas de óxido de titânio); e um Tipo IV, mais raro e composto por poucas estrelas vermelhas, em cujo espectro ele encontrou linhas de carbono (McCARTHY, 1950)¹. O padre italiano chegou, sozinho, a classificar os espectros de cerca de quatro mil estrelas (RIGGE, 1918), catalogando cerca de quinhentas delas em seu sistema (HOFFLEIT, 2002); esse foi um feito que justifica o epíteto de “pai da classificação espectral”, que por vezes lhe é atribuído. Nos anos seguintes, tentativas de estabelecer um sistema ainda mais abrangente que o de Secchi seriam feitas por Hermann Vogel (1841-1907) em Potsdam e por Norman Lockyer (1836-1920) em Londres (FROST, 1908; CORTIE, 1921); seria, no entanto, em Harvard que um grupo de jovens e brilhantes astrônomas lideradas pelo diretor do Harvard College Observatory, Edward Pickering (1846-1919) conseguiria concretizar, entre 1886 e 1924, a admirável tarefa de analisar e classificar os espectros de centenas de milhares de estrelas, criando o sistema de classificação espectral que é usado até nossos dias e abrindo o caminho para o desenvolvimento da Astrofísica moderna. Vejamos como isso foi feito.

7.1.1 A classificação de Harvard

Nos primeiros anos da espectroscopia, a fotografia dos espectros das estrelas (com exceção do Sol) ainda era tecnicamente muito difícil, e por isso a classificação dos espectros era feita visualmente. Foi apenas em 1872 que Henry Draper (1837-1882) obteve a primeira fotografia de um espectro estelar (da estrela Vega). Draper era um médico conceituado e próspero, e também um astrônomo amador e astrofotógrafo dedicado, tendo também construído seu próprio espectroscópio. Após sua morte, sua

¹ Anos após, Secchi agregaria à sua classificação um “Tipo V” bastante raro: tratava-se de estrelas quentes que apresentavam linhas de emissão brilhantes de hélio, carbono e nitrogênio (essas estrelas são hoje conhecidas como “estrelas Wolf-Rayet”).

viúva, Anna Palmer Draper, criou o Henry Draper Memorial Fund, que iria doar generosos recursos ao Harvard College Observatory para a preparação de um grande catálogo de estrelas que incluísse a sua classificação espectral.

Com os recursos recebidos em 1886 do Draper Fund, o então diretor do Observatório, Edward Pickering, conseguiu formar uma equipe de jovens e talentosas astrônomas (incluindo Williamina Fleming, Antonia Maury, Annie Jump Cannon e Henrietta Leavitt) para executar o formidável trabalho de examinar dezenas de milhares de placas fotográficas, medir e analisar as linhas espectrais de cada estrela nelas existentes e classificá-las (CANNON, 1915).

Já em 1890, aparecia o primeiro produto desse trabalho, sob a forma de um catálogo com a classificação espectral de 10.351 estrelas, que foi publicado com o nome de *The Draper Catalogue of Stellar Spectra* (PICKERING, 1890). Apesar desse catálogo (segundo a praxe da época em Harvard) ter sido assinado por Pickering na qualidade de diretor do Observatório, o trabalho de classificação foi realizado praticamente na íntegra por Williamina Fleming. O esquema de classificação empírico nele utilizado (também desenvolvido por Fleming) subdividia as classes de Secchi em tipos mais específicos, que eram nomeados de A até N, além das letras O (para as estrelas da classe V de Secchi), P (para nebulosas planetárias) e Q (para outros objetos). Essa nomenclatura se constituiria no primeiro passo para aquilo que seria a futura classificação espectral de Harvard.

Os trabalhos para a fase seguinte (a publicação de um catálogo ainda mais extenso) se iniciaram em 1911. Com a morte de Fleming naquele ano, a liderança do grupo passou para Annie Cannon. À medida que os trabalhos prosseguiam, o número de estrelas catalogadas foi enormemente ampliado, abrangendo agora todo o céu: as estrelas do Hemisfério Sul puderam ser incluídas graças à instalação de uma estação austral do observatório, situada em Arequipa, no Peru, a uma altura de 2.500 m (CANNON, 1915). Como seria de se esperar, a classificação inicial de Fleming teve de ser também gradualmente aperfeiçoada durante esse trabalho – não só para incluir os numerosos espectros peculiares que surgiam, mas também para associar a sequência em que os tipos eram listados a uma característica física conhecida (no caso, a *temperatura efetiva*). Assim, a classificação final de Harvard, ao contrário de todas as anteriores, tem como critério uma *sequência descendente de temperaturas efetivas*.

Nessa classificação, Cannon manteve o sistema de letras originalmente usadas por Fleming para os tipos básicos – porém não na mesma ordem. Para refletir uma

seqüência de temperaturas efetivas decrescentes, os tipos básicos foram renomeados na seguinte ordem²:

O, B, A, F, G, K, M

Além disso, Cannon criou também subtipos para cada um desses tipos espectrais, adicionando, após cada letra, um algarismo que podia variar entre 0 e 9. Por exemplo, as estrelas listadas como A0 possuíam temperaturas efetivas mais altas que as listadas como A2, e assim por diante.

O resultado de mais de vinte anos de trabalho do grupo de Harvard foi o monumental *Henry Draper Catalogue*, que continha as magnitudes, as posições e os tipos espectrais de 225.300 estrelas (até a nona magnitude) segundo a classificação de Harvard. Esse catálogo (hoje conhecido como “Catálogo HD”) foi publicado nos volumes 91 a 99 dos *Annals of Harvard College Observatory*, entre 1918 e 1924 (KALER, 1997). Finalmente, após a morte de Pickering em 1919, Cannon publicaria, em seis volumes entre 1925 e 1936, uma extensão do catálogo HD, com 46.850 estrelas adicionais... e continuou trabalhando incessantemente até que, quando de sua morte em 1941, o total geral já abrangia mais de 395 mil estrelas (GRAY; CORBALLY, 2009). Os catálogos HD produzidos em Harvard, bem como a classificação neles utilizada, são alicerces da espectroscopia estelar e são usados até os dias de hoje.

A Tabela 7.1 lista um resumo das características principais dos tipos espectrais básicos da classificação tradicional de Harvard.

Tipo espectral	Temperatura	Características espectrais	Cor	Exemplo
O	> 30.000 K	Linhas fortes de HeII; linhas de H fracas; linhas de metais multi-ionizados	Azul	λ Orionis
B	10.000 – 30.000 K	Linhas fortes de HeI; linhas de H moderadas	Branco-azulada	Rigel
A	7.500 – 10.000 K	Linhas de H em seu máximo	Branca	Vega
F	6.000 – 7.500 K	Linhas fortes de metais mono-ionizados; linhas de H moderadas	Branco-amarelada	Procyon
G	5.000 – 6.000 K	Linhas fortes de metais mono-ionizados; linhas de H fracas	Amarela	Sol
K	3.500 – 5.000 K	Linhas fortes de metais neutros e mono-ionizados; linhas de H fracas	Laranja	Arcturus
M	< 3.500 K	Bandas fortes de moléculas (TiO); linhas fortes de metais neutros; linhas de H muito fracas	Vermelha	Betelgeuse

Tabela 7.1: Classificação espectral tradicional de Harvard. (De acordo com LEBLANC, 2010.)

² Rapidamente, os estudantes de Harvard criaram uma fórmula mnemônica para memorizar a ordem dessa seqüência espectral: a frase *Oh, Be A Fine Girl; Kiss Me* (“Oh, seja uma boa garota e me beije”).

Graficamente, podemos comparar os dados da Tabela 7.1 com uma montagem de diversos perfis espectrais de acordo com a classificação de Harvard, vista na Figura 7.1. Essa figura mostra um exemplo de espectros de estrelas de cada classe (O5, B3, A6, F6, G7, K5 e M4), e foi produzida a partir de espectros reais obtidos no Observatório Kitt Peak (JACOBY; HUNTER; CHRISTIAN, 1984). Através dela, podemos notar diversas características que vimos até este ponto:

- Note que, de O5 até M4 (de cima para baixo no gráfico), temos uma sequência decrescente de temperaturas, que é o critério usado para a classificação de Harvard.
- Observando consecutivamente as curvas desde O5 até M4 (ou seja, da estrela mais quente para a mais fria), podemos notar que o pico de emissão do contínuo se desloca gradativamente para a direita (ou seja, para as regiões de maior comprimento de onda). Isso nada mais é que a expressão da lei de Wien, que vimos no Capítulo 6.
- As linhas de Balmer do hidrogênio (indicadas na Figura 7.1 como $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$ e $H\delta$) aparecem fracamente na estrela O5 e se tornam mais intensas até atingir o máximo na estrela A6. A partir daí, elas enfraquecem novamente até se tornarem quase imperceptíveis nas estrelas K5 e M4. Note que isso é exatamente o que se vê não só na Tabela 7.1, mas também na Figura 6.9 (ver item 6.7 do Capítulo 6).
- As linhas de metais neutros (Ca, Mg, Na) são mais fortes nas estrelas G7 e K5.
- As bandas moleculares (TiO) são perceptíveis apenas na estrela M4.

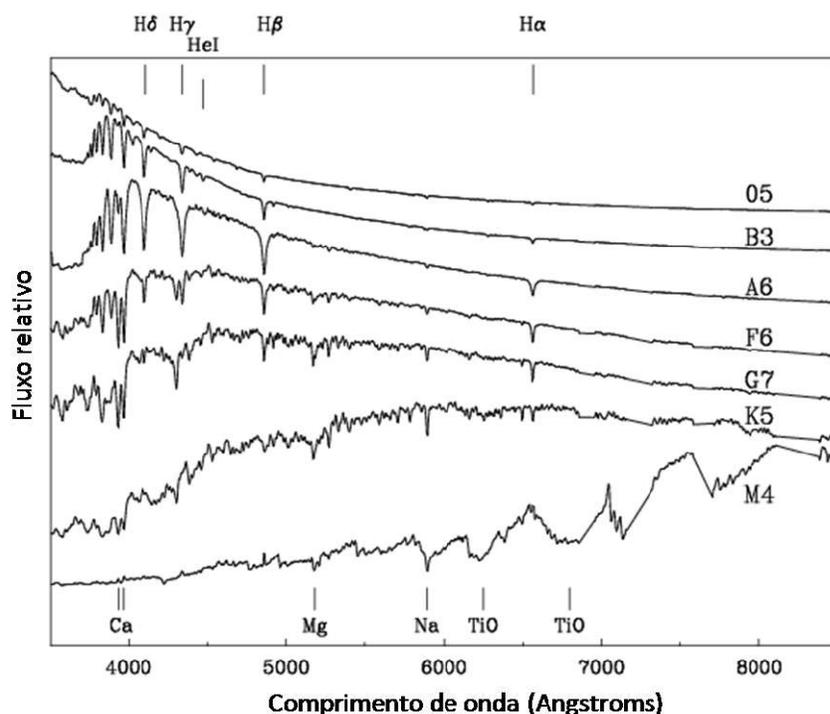


Figura 7.1 – Exemplos de perfis espectrais de estrelas de diversas classes espectrais de Harvard. (De acordo com JACOBY; HUNTER; CHRISTIAN, 1984.)

7.1.2 Extensões da classificação de Harvard

Posteriormente à publicação dos catálogos HD (a partir de meados do século XX), foram descobertas algumas classes mais raras de estrelas que apresentavam peculiaridades em seus espectros, apesar de mostrarem algumas das características dos tipos clássicos. Trata-se de grupos relativamente pequenos, razão pela qual às vezes nem são mencionados como classes espectrais à parte. Nesse caso estão:

- Estrelas de massas e temperaturas ainda mais altas do que as da classe O, e que apresentavam como peculiaridade linhas de emissão muito fortes e largas de hidrogênio, hélio, carbono, oxigênio e nitrogênio ionizados. Já presentes nas classificações de Secchi e Fleming e incluídas por Cannon na classe O, essas estrelas passaram a ser chamadas “estrelas Wolf-Rayet” e a ser indicadas por “classe W”. Acredita-se hoje que a forte emissão das Wolf-Rayet venha de camadas de gases quentes ejetados pela estrela no espaço a altas velocidades. Há dois subgrupos entre as Wolf-Rayet: as ricas em carbono, que se indicam por WC, e as ricas em nitrogênio, que se representam por WN.
- Na faixa de baixas temperaturas, duas classes raras de estrelas vermelhas gigantes, que Cannon supunha pertencerem aos tipos K e M, mas que apresentavam também em seu padrão espectral um excesso de carbono e seus compostos, como CO e CN. Seu teor de carbono chega a ser quatro a cinco vezes maior que em estrelas K e M normais. Essas estrelas passaram a ser conhecidas como “estrelas de carbono” e costumam ser indicadas como classes R e N. As estrelas da classe R se aproximam mais das K normais; as da classe N, das M normais. Alguns astrônomos preferem enquadrá-las todas dentro de uma mesma classe, que nesse caso é referida como “classe C”.
- Uma outra classe rara de estrelas vermelhas e frias que apresentava, em vez das bandas de óxidos de titânio e vanádio comuns na classe M, linhas de absorção de elementos pesados como zircônio e bário. Muitas delas são também estrelas variáveis, e são conhecidas como “classe S”.³
- Finalmente, já em fins do século XX, com o avanço da instrumentação astronômica e as observações na faixa do infravermelho, foram descobertas algumas centenas de estrelas anãs vermelhas extremamente frias (1400-2000 K) e com linhas de hidretos de metais, em vez dos óxidos metálicos existentes na classe M. Os descobridores propuseram incluí-las em uma nova classe chamada “classe L”, à parte de tradicional classe M (KIRKPATRICK et al., 1999). Os mesmos autores propuseram ainda a criação de mais outra classe: a “classe T”, que seria formada por algumas dezenas de *anãs marrons* (objetos que

³ Não tardou para que os criativos estudantes de Harvard adaptassem a sua fórmula mnemônica para abranger as novas classes espectrais catalogadas através de uma nova frase: *Wow! Oh, Be A Fine Girl; Kiss Me Right Now, Sweetheart*, que poderíamos traduzir como “Uau! Oh, seja uma boa garota e me beije agora mesmo, querida”.

tecnicamente nem poderiam ser chamados de estrelas), e que por serem ainda mais frios (abaixo de 1300 K) são extremamente difíceis de detectar, a não ser no infravermelho e/ou com telescópios espaciais. Nos últimos anos, propôs-se ainda a existência de uma subclasse de anãs marrons ainda mais frias (“classe Y”), com temperaturas abaixo de 500 K. Como, no entanto, não existe consenso entre os astrônomos em relação à conveniência da inclusão de todos esses objetos subestelares na classificação espectral regular (bem como na total impossibilidade de observar qualquer deles com os instrumentos que fazem parte do escopo deste trabalho), não os incluiremos doravante aqui, optando por nos atermos exclusivamente à tipologia clássica (OBAFGKM) de Harvard.

7.1.3 Classes de luminosidade: o sistema de Morgan-Keenan (MK)

O sistema de Harvard recebeu um refinamento na década de 1940, introduzido pelos astrônomos norte-americanos William Morgan (1906-1994) e Philip Keenan (1908-2000). Ao elaborar o seu *Atlas of Stellar Spectra* (1943), eles perceberam que havia necessidade de levar em consideração o fato de que, para a mesma classe espectral, podiam existir estrelas de diferentes luminosidades (por exemplo, gigantes ou anãs da classe M), cujos espectros apresentavam diferenças que não eram refletidas pela classificação de Harvard, baseada unicamente na temperatura efetiva. Morgan e Keenan estabeleceram então um esquema de classificação “bidimensional”, levando em conta tanto a temperatura como a luminosidade das estrelas (KEENAN, 1985). É importante notar que esse sistema (hoje denominado MK) não elimina, mas sim complementa o sistema de Harvard. Para tanto, foi simplesmente adicionado um numeral romano ao fim do tipo espectral de Harvard, para indicar também a classe de luminosidade da estrela. Essas classes foram nomeadas como segue:

Classe	Característica
Ia	Supergigantes mais luminosas
Ib	Supergigantes
II	Gigantes luminosas
III	Gigantes normais
IV	Subgigantes
V	Estrelas da sequência principal (anãs)

Tabela 7.2: Classes de luminosidade de Morgan-Keenan. (COX, 1999.)

Nosso Sol, por exemplo, é indicado como uma estrela G2V na classificação MK. Essa é a forma de classificação espectral usada universalmente nos dias de hoje. Por fim, é interessante notar que algumas estrelas apresentam certas peculiaridades em seus espectros, que não são descritas mesmo na classificação MK. Para esses casos, convencionou-se adicionar um sufixo ao tipo MK da estrela, indicando a razão da peculiaridade (ver Tabela 7.3).

Sufixo	Peculiaridade
e	Linhas de emissão presentes
f	Linhas de emissão de NIII e Hell (estrelas O)
p	Outra peculiaridade
n	Linhas largas
s	Linhas finas (sharp)
k	Linhas interestelares presentes
m	Linhas metálicas

Tabela 7.3 – Alguns sufixos que indicam peculiaridades no espectro. (Cox, 2000.)

7.2 O diagrama de Hertzsprung-Russell

7.2.1 Diagrama HR: desenvolvimento

Curiosamente, tanto as classes de luminosidade como até o próprio diagrama HR poderiam ter sido desenvolvidos algumas décadas mais cedo. Durante os trabalhos de rotina de classificação espectral, uma das jovens astrônomas de Harvard – Antonia Maury – que era considerada uma das mais inteligentes (e certamente a mais independente) do grupo, extrapolou as rígidas instruções de seu superior Pickering e introduziu, para as estrelas que lhe foram designadas, uma subclassificação em três divisões (**a**, **b** e **c**), para indicar se as linhas espectrais eram largas, normais ou finas – numa antevisão do que seria o sistema MK criado décadas após. Esse trabalho foi publicado em 1897 (MAURY; PICKERING, 1897), porém a subdivisão introduzida por Maury foi duramente criticada por Pickering como sendo “uma mera perda de tempo” (HOFFLEIT, 2002). Felizmente, no entanto, a perspicaz intuição de Maury não passou despercebida: em 1905 e 1907, o astrônomo dinamarquês Ejnar Hertzsprung (1873-1967) publicou uma sua descoberta, baseada em análises dos movimentos próprios estelares, de que certas estrelas de mesma cor deveriam possuir dois grupos distintos de luminosidades intrínsecas. Sendo assim, raciocinou Hertzsprung, essa diferença deveria ser refletida em seus espectros. Consultando os catálogos já publicados por Pickering, Fleming e Cannon, ele não encontrou nada relevante; porém, ao ler o catálogo de 1897 de Maury, percebeu que as estrelas que ela havia designado como “classe c” (aquelas que apresentavam linhas finas no espectro) correspondiam precisamente ao que ele havia descoberto em suas pesquisas: eram estrelas de luminosidade intrínseca muito alta (que conhecemos hoje como gigantes e supergigantes). Em um artigo publicado pouco depois (HERTZSPRUNG, 1908), Hertzsprung reconheceu a importância da classificação de Maury e escreveu uma carta a Pickering, mencionando que ela era o “*avanço mais importante da classificação espectral desde os trabalhos de Secchi e Vogel*”, e deplorando o fato de Pickering não tê-la incluído nos trabalhos posteriores feitos em Harvard. Com bom humor, Hertzsprung escreveu: “*Negligenciar as propriedades da classe c em uma classificação*

espectral é mais ou menos fazer o mesmo que um zoólogo que tivesse reconhecido que existem diferenças entre uma baleia e um peixinho, e que continuasse classificando os dois juntos”(HOFFLEIT, 2002). Talvez enciumado⁴, ou até por não ter compreendido todo o alcance da descoberta de Hertzsprung, Pickering se recusou a aceitar a importância dessa subclassificação (algo que, como vimos, só seria reparado por Morgan e Keenan em 1943). Hertzsprung, no entanto, usou os dados de Maury para mostrar que todas as estrelas da classe *c* possuíam movimentos próprios insignificantes, e por conseguinte elas teriam necessariamente de ser intrinsecamente muito mais luminosas do que as outras da mesma classe espectral e magnitude aparente. Ou seja: se duas estrelas possuem a mesma cor e temperatura, mas uma está mais distante que a outra, então ela terá de ser também intrinsecamente mais luminosa.

A grande questão que se colocava em inícios da década de 1910 era *como* estabelecer uma correlação entre os tipos espectrais das estrelas (*ou* suas temperaturas efetivas, *ou* seus índices de cor, grandezas que já sabemos estarem relacionadas) e as luminosidades intrínsecas das mesmas. Ora, como vimos anteriormente (Capítulo 5, itens 5.3 e 5.7), a luminosidade intrínseca de uma estrela é expressa por meio de sua *magnitude absoluta*, que *não* é mensurável diretamente da Terra; porém a *magnitude aparente*, sim, é medida diretamente com facilidade. Dessa forma, se fosse possível determinar por qualquer processo a distância em que a estrela se encontra, a magnitude absoluta poderia ser calculada facilmente através da equação do módulo de distância (Capítulo 5, item 5.7, equação (5.6)). A chave para elucidar o problema, portanto, estava em encontrar a forma de contornar a dificuldade em estimar as distâncias (*ou*, em outras palavras, em como converter a magnitude aparente de uma estrela (medida) na sua magnitude absoluta (calculada)).

Trabalhando independentemente e por métodos distintos, dois astrônomos chegariam quase simultaneamente à solução daquela questão: nosso já conhecido Ejnar Hertzsprung (em 1911) e o norte-americano Henry Norris Russell (em 1913). Ambos apresentaram seus resultados graficamente, em um diagrama que passou a ser conhecido como “diagrama de Hertzsprung-Russell” (ou “diagrama HR”), e que hoje é considerado uma das ferramentas mais poderosas da Astrofísica Estelar. Nos parágrafos seguintes, iremos examinar seu significado e suas aplicações. Porém, antes, cabe abrir um parênteses para um fato curioso e muito pouco conhecido, que foi descoberto por historiadores de ciência contemporâneos: o primeiro diagrama “tipo HR” a ser *publicado* não foi preparado por Russell e nem mesmo por Hertzsprung, mas

⁴ Em sua autobiografia, Cecilia Payne-Gaposchkin (1900-1979), talvez a mais brilhante astrofísica de todo o século XX, e que em sua juventude chegou a trabalhar com Maury e Pickering em Harvard, relata que a relação entre ambos sempre foi conflituosa, dada a independência de Maury e a intolerância de Pickering; e que este último considerava que a sua equipe “*tinha sido contratada para trabalhar, e não para pensar*” (PAYNE-GAPOSCHKIN, 1979).

sim pelo jovem astrônomo alemão Hans Rosenberg (1879-1940), em um trabalho usado como teste para sua admissão ao cargo de professor da Universidade de Tübingen (ROSENBERG, 1910)⁵. O diagrama original publicado por Rosenberg pode ser visto na Figura 7.2. O tema da pesquisa (em português, “Sobre a relação entre brilho e tipo espectral no aglomerado das Plêiades”) havia sido sugerido a Rosenberg pelo célebre astrônomo Karl Schwarzschild (1873-1916), na época seu orientador na Universidade de Göttingen. Descobriu-se, no entanto, que um ano antes da publicação de Rosenberg, o próprio Hertzsprung já havia visitado Schwarzschild em Göttingen, levando com ele, para discutir com o mestre, uma cópia preliminar do seu próprio trabalho inédito, que ele publicaria em 1911. Assim, tudo indica que Hertzsprung tenha sido de fato o primeiro na *concepção* do diagrama HR, mesmo que não o tenha sido em uma *publicação*. Detalhes desse curioso fato e uma cópia do trabalho de Rosenberg em inglês podem ser vistos em ONDRA, 2000.

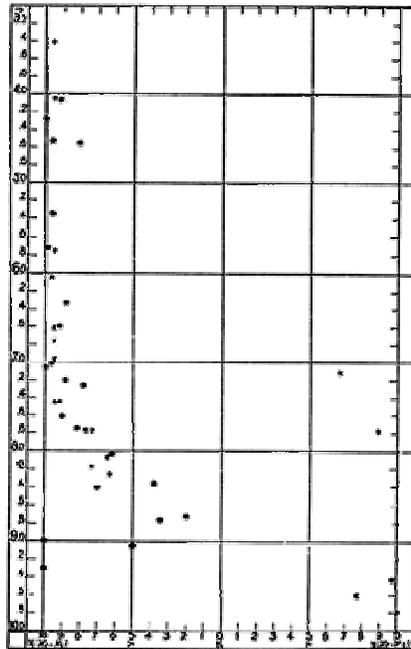


Figura 7.2 – Diagrama obtido por Rosenberg em 1910. Nas ordenadas, as magnitudes aparentes de estrelas do aglomerado aberto das Plêiades (M45); nas abscissas, a relação entre as intensidades médias das linhas de cálcio com as das linhas de hidrogênio. Essa relação era um indicativo aproximado da classificação espectral das estrelas. (Crédito: ROSENBERG, 1910.)

Voltemos agora aos trabalhos independentes de construção do diagrama HR por Hertzsprung e Russell. Para contornar o problema do desconhecimento da distância

⁵ É possível que uma das razões para a pouca divulgação dos trabalhos de Rosenberg na Alemanha tenha sido o fato de ele ser judeu, principalmente após a ascensão de Adolf Hitler ao poder em 1933. Assim como outros cientistas judeus, ele sofreria numerosas represálias, sendo demitido de seu posto de diretor do Observatório de Kiel e tendo de emigrar para os Estados Unidos em 1934. Ver THEIS et al., 1996.

individual de cada estrela, Hertzsprung usou um artifício engenhoso: construiu seu diagrama com base nas estrelas de dois aglomerados abertos: as Plêiades e as Híades. Ora, como todas as estrelas de qualquer aglomerado estelar estão aproximadamente à mesma distância da Terra, a *relação* entre as suas magnitudes absolutas é a mesma que a relação entre suas magnitudes aparentes. Os resultados de Hertzsprung, publicados em 1911 na *Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam*, são vistos nos dois gráficos na esquerda da Figura 7.3. O gráfico (a) corresponde ao aglomerado das Plêiades (note a semelhança com o gráfico de Rosenberg). No eixo horizontal, vê-se o comprimento de onda em angstroms (um indicativo da cor de cada estrela)⁶. No eixo vertical, as magnitudes aparentes. O gráfico (b) é semelhante, mas para o aglomerado das Híades⁷. O tipo de gráfico construído por Hertzsprung chama-se diagrama cor-magnitude (outro nome pelo qual o diagrama HR é conhecido).

Já Russell não se baseou em um aglomerado, mas usou outro caminho não menos engenhoso: ele classificou os espectros das 300 estrelas mais próximas do Sol, cujas paralaxes (e portanto distâncias) eram conhecidas na época. O resultado é o gráfico (c) da Figura 7.3, no qual os tipos espectrais dessas estrelas se encontram no eixo das abscissas, e suas magnitudes absolutas, nas ordenadas (ver RUSSELL, 1914).

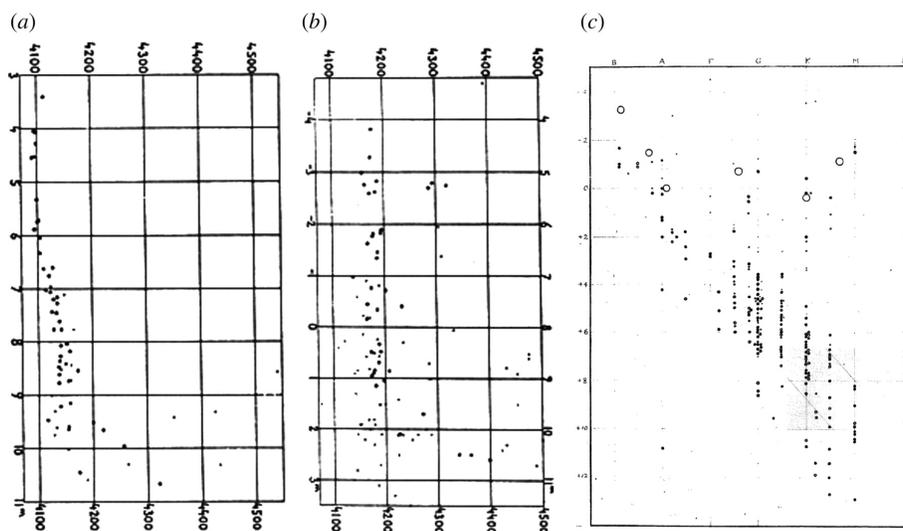


Figura 7.3 – Diagramas HR originais: (a) de Hertzsprung para as Plêiades, (b) de Hertzsprung para as Híades e (c) de Russell para as 300 estrelas cujas paralaxes eram conhecidas.

(Crédito: KALIRAI; RICHER, 2010.)

Notava-se claramente que, tanto nos diagramas de Hertzsprung como no de Russell, as estrelas não se distribuíam ao acaso: ao contrário, elas se concentravam em uma faixa

⁶ Na Figura 3, os dois gráficos de Hertzsprung foram rotacionados de 90° para facilitar a comparação visual com o gráfico de Russell pelo leitor.

⁷ No caso das Híades, Hertzsprung pôde indicar também as magnitudes absolutas no gráfico (b), pois a distância desse aglomerado (medida por paralaxe estatística) já era conhecida (GINGERICH, 2013).

diagonal que ia desde o extremo superior esquerdo (estrelas mais luminosas e de cor mais azul) até o inferior direito (estrelas mais fracas e de cor mais avermelhada). Estava evidente que havia uma relação bem definida entre as cores (ou tipos espectrais) e as magnitudes absolutas (ou luminosidades) das estrelas em ambos os casos. Nos tópicos a seguir, iremos interpretar esse resultado e entender seu significado e aplicações para a Astrofísica Estelar.

7.2.2 Diagrama HR: interpretação

Para facilitar a interpretação, vamos partir inicialmente de um diagrama HR moderno, como o visto na Figura 7.4. A amostra para construir esse diagrama foi composta por todas as estrelas visíveis a olho nu no céu, e mais todas as estrelas que se encontram a até 25 parsecs de distância de nós. É como se estivéssemos fazendo um “recenseamento” de todas as estrelas nessas condições. Cada ponto do diagrama é uma estrela. Antes de prosseguir em nossa análise, lembremos alguns conceitos fundamentais já vistos:

- A *magnitude absoluta* nada mais é do que uma medida da *luminosidade* intrínseca de uma estrela.
- O *índice de cor* é uma medida da *temperatura efetiva* de uma estrela.
- Os *tipos espectrais* se correlacionam tanto com a *temperatura* como com o *índice de cor*.

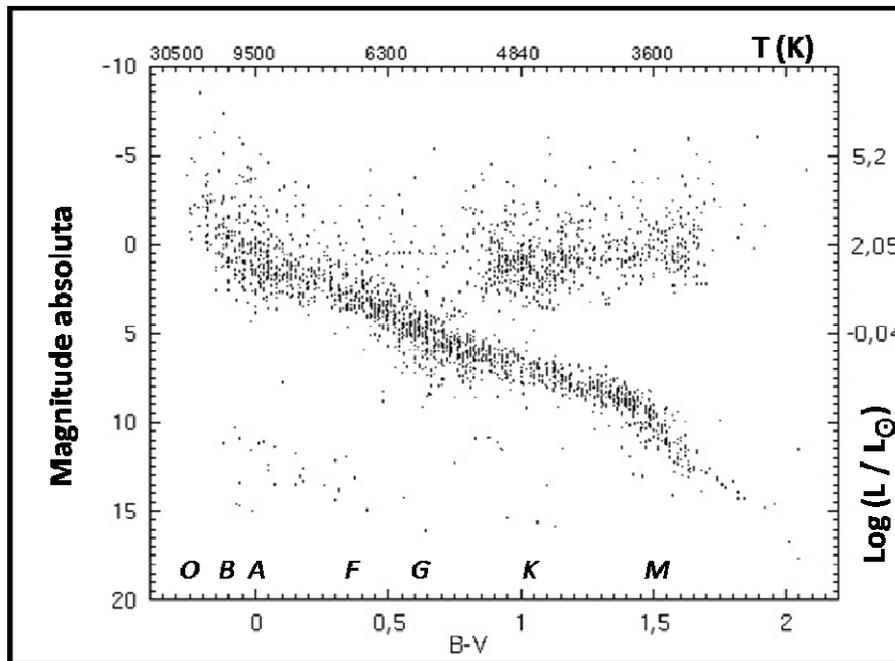


Figura 7.4: Um diagrama HR moderno. Ver texto para detalhes. (Crédito: STROBEL, 2013.)

Tendo isso em mente, note inicialmente as legendas dos eixos do diagrama da Figura 7.4:

- No eixo vertical, podemos indicar tanto a *magnitude absoluta* (como visto na escala à esquerda) como também a *luminosidade* (como na escala à direita). *Note que, por convenção, a escala de luminosidades cresce de baixo para cima.*
- No eixo horizontal, podemos plotar o *índice de cor* (como visto na escala abaixo da figura) ou então a *temperatura efetiva*, indicada em K (escala acima da figura), ou ainda o tipo espectral (indicado pelas letras OBAFGKM no interior da figura). *Note que a escala de temperaturas, por convenção, cresce da direita para a esquerda.*

Examinemos agora a *distribuição das estrelas* no diagrama. Assim como ocorria nos diagramas históricos de Hertzsprung e Russell, ela não é ao acaso: ao contrário, as estrelas se concentram em algumas regiões:

- A maior parte das estrelas está de fato na faixa diagonal que vai desde o extremo superior esquerdo (estrelas mais luminosas, quentes e azuis) até o inferior direito (estrelas frias, vermelhas e pouco luminosas). Essa é a chamada *sequência principal* do diagrama HR. Seus tipos espectrais, temperaturas e cores são variados, mas todas elas se enquadram na classe de luminosidade V. Tipicamente, a sequência principal de uma amostra grande e aleatoriamente selecionada de estrelas (por exemplo, todas as estrelas da Via Láctea) pode conter mais de 90% do total de estrelas do diagrama. *Examinando a sequência principal com mais cuidado, perceberemos que ela é também uma escala de massas: em outras palavras, as estrelas de maior massa da sequência principal são justamente as mais quentes e mais luminosas.*
- Uma segunda região que concentra um número razoável de estrelas está acima e à direita da sequência principal. Note que elas são vermelhas, frias e luminosas. Se nos lembrarmos da lei de Stefan-Boltzmann⁸ para o cálculo da luminosidade, perceberemos que a única forma de essas estrelas frias poderem estar nessa região do diagrama é possuírem diâmetros muito grandes. Essa é a chamada *região das gigantes vermelhas*. Elas pertencem às classes II ou III de luminosidade.
- Algumas estrelas mais esparsas estão no topo do diagrama, na região de maior luminosidade. A maioria delas é azul, mas também há algumas vermelhas. Essa é a região das *supergigantes*, das classes de luminosidade Ia e Ib.
- Finalmente, existe um quarto grupo de estrelas no quadrante inferior esquerdo. São estrelas quentes e pouco luminosas. Lembrando mais uma vez a lei de Stefan-Boltzmann, notamos que elas só poderiam ter dimensões muito pequenas. E é exatamente isso o que ocorre. Essa é a região das *anãs brancas*: estrelas com um diâmetro não muito diferente do diâmetro terrestre.

A aparência geral de todos os diagramas HR é então sempre igual? A resposta é **não**. De acordo com os critérios que usamos para selecionar a amostra que desejamos

⁸ A lei de Stefan-Boltzmann, vista no Capítulo 6, item 6.1.3, mostra que a luminosidade de uma estrela varia com o quadrado do seu raio e com a quarta potência da sua temperatura efetiva.

estudar, o diagrama HR poderá ter uma aparência diferente da Figura 7.4. Isso não quer dizer, é claro, que as definições das regiões do diagrama HR serão diferentes para cada gráfico. O que pode ocorrer é que na amostra que escolhemos para construir nosso diagrama poderá haver um número maior (ou menor) de estrelas em cada uma das regiões. Assim, o aspecto final de cada diagrama HR é afetado pelos *critérios de seleção*. Vamos entender melhor isso através de dois exemplos.

Vimos que a amostra para construir o diagrama HR da Figura 7.4 era composta por todas as estrelas visíveis a olho nu no céu, e mais todas as estrelas que se encontram a até 25 parsecs de distância de nós. Vamos agora adotar dois critérios de seleção diferentes e ver o que acontece com o aspecto do diagrama. Os dados dos gráficos a seguir são reais e foram obtidos pela sonda *Hipparcos*, da European Space Agency.

Se construíssemos o diagrama HR para as *cem estrelas mais brilhantes que vemos no céu noturno* (um critério de magnitude aparente) ele teria a aparência da Figura 7.5:

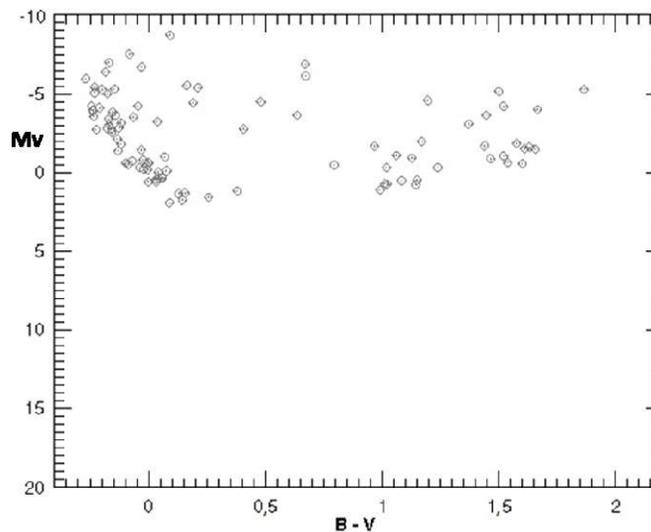


Figura 7.5 – Diagrama HR das cem estrelas mais brilhantes que podemos observar no céu noturno. (Adaptado de STROBEL, 2013.)

A primeira coisa que se nota é que praticamente todas as estrelas que aparecem na Figura 7.5 possuem magnitude absoluta igual ou mais brilhante que $M_V = 2$. Comparemos com a Figura 7.4 e vejamos a que região correspondem essas estrelas. É fácil perceber que *quase todas as cem estrelas mais brilhantes do céu pertencem às regiões mais luminosas da sequência principal, ou são gigantes e supergigantes*.

Mudemos agora o critério de seleção e escolhamos apenas as *cem estrelas mais próximas do Sol* para montar seu diagrama HR. Os dados do *Hipparcos* mostram que todas essas cem estrelas mais próximas se encontram a uma distância de até 7,63 parsecs do Sol. O diagrama HR terá o aspecto da Figura 7.6.

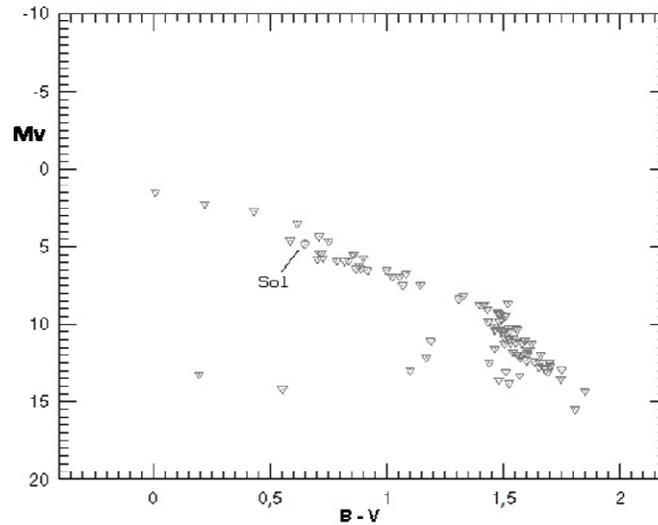


Figura 7.6 – Diagrama HR das cem estrelas mais próximas do Sol. (Adaptado de STROBEL, 2013.)

Note que agora temos a situação inversa: a maioria absoluta das estrelas que aparecem no diagrama da Figura 7.6 (ou seja, nas vizinhanças solares até 7,63 pc de distância) são *pouco luminosas e frias*. A posição do Sol está indicada para comparação (ele é uma das estrelas mais luminosas *nesta minúscula região da Via Láctea*).

Se desejássemos fazer finalmente um teste de confirmação, poderíamos combinar os critérios usados para construir os diagramas das Figuras 7.5 e 7.6 – ou seja, unindo as cem estrelas mais brilhantes com as cem mais próximas do Sol. Fazendo isso, seria de se esperar que o diagrama HR resultante não tivesse um aspecto muito diferente do diagrama da Figura 7.4, que usou um critério parecido (apenas com mais estrelas e uma distância maior). De fato, é exatamente isso o que acontece: esse diagrama composto é visto na Figura 7.7. Note que basicamente, ele tem aspecto semelhante ao da Figura 7.4.

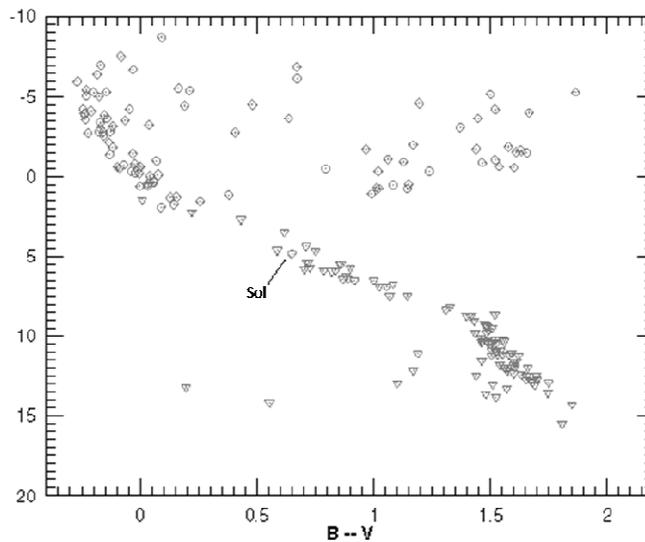


Figura 7.7 – Diagrama HR com os critérios combinados das Figuras 7.5 e 7.6. (Adaptado de STROBEL, 2013.)

Uma forma de reduzir esses efeitos dos critérios de seleção é utilizar uma amostra mais ampla e representativa do universo estatístico estudado. Se este, por exemplo, consistisse em todas as estrelas da Via Láctea (cerca de duzentos bilhões), é claro que uma amostra de apenas cem estrelas dificilmente terá boa representatividade. Uma amostra de cerca de cinco mil estrelas, como aquela recolhida pelo mesmo satélite *Hipparcos* com todas as estrelas cuja paralaxe foi medida com precisão melhor que 5% (diagrama HR da Figura 7.8), naturalmente, será bem mais representativa da situação real da população estelar da nossa Galáxia.

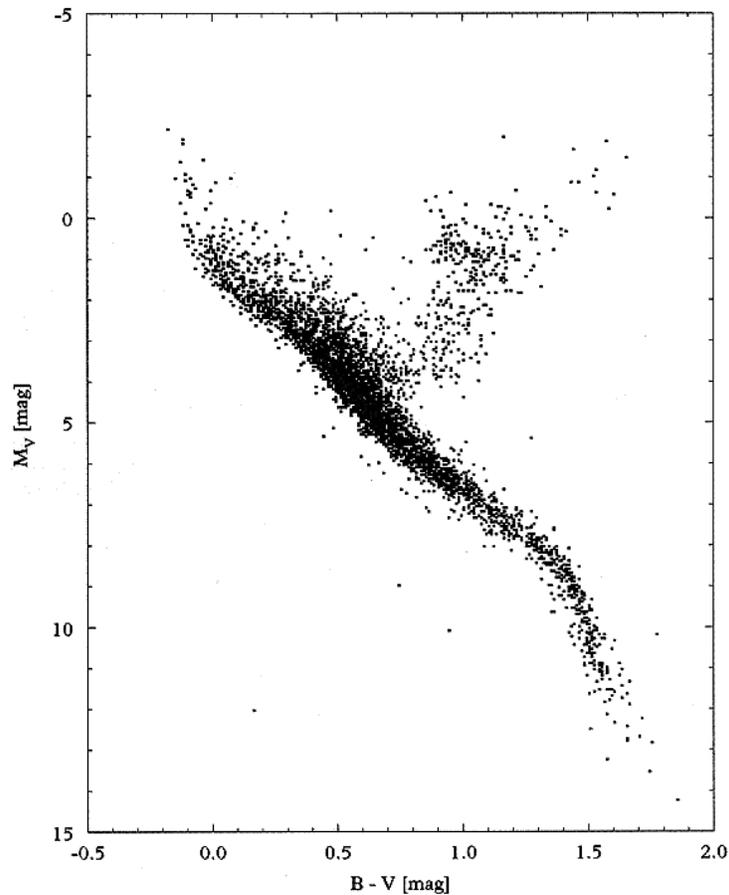


Figura 7.8 – Diagrama HR de 4902 estrelas da Via Láctea. (Crédito: ESA/Hipparcos.)

Finalmente, a Figura 7.9 nos permite uma amostra bem mais abrangente da população estelar da Via Láctea, reunindo 22 mil estrelas do catálogo Hipparcos com mil estrelas do Catálogo Gliese de estrelas próximas. Sobre o diagrama HR estão sobrepostas linhas correspondentes à classificação MK de luminosidade (item 7.1.3). Observar as legendas equivalentes dos eixos, expressas em índice de cor, temperatura e classe espectral nas abscissas, e magnitude absoluta e luminosidade nas ordenadas.

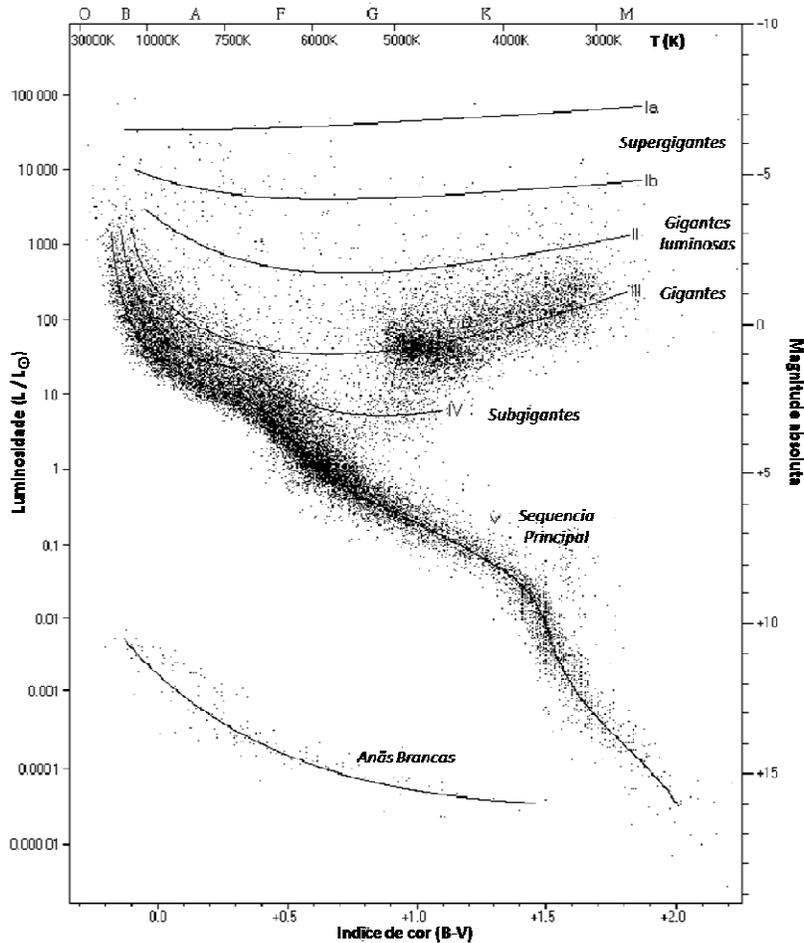


Figura 7.9 – Diagrama HR de 22 mil estrelas da Via Láctea (Catálogo Hipparcos) e mais mil estrelas do Catálogo Gliese de estrelas próximas. (Adaptado de POWELL, 2006.)

7.2.3 Diagrama HR: algumas aplicações

Como já mencionamos, o diagrama HR é uma ferramenta poderosíssima para a Astrofísica Estelar, permitindo obter parâmetros que seriam impossíveis de medir sem sua ajuda. Um deles, para exemplificar, é a distância das estrelas que estão longínquas demais para que se possa medir a sua paralaxe trigonométrica. O processo que usa o diagrama HR para determinação de distâncias chama-se *paralaxe espectral*⁹. Simplificadamente, ele pode ser executado através dos seguintes passos:

- Mede-se por fotometria a magnitude aparente m da estrela cuja distância se quer determinar.
- Por espectroscopia, determina-se o tipo espectral da estrela e a sua classe de luminosidade. Alternativamente, pode-se usar o índice de cor (B-V).

⁹ Um nome por sinal bastante infeliz, pois o processo nada tem a ver com a definição de paralaxe, mas que é mantido por tradição.

- Com o tipo espectral e a classe de luminosidade, plota-se a posição da estrela em um diagrama HR padrão (de calibração). Obtém-se assim a luminosidade da estrela e/ou sua magnitude absoluta **M**.
- Com as magnitudes aparente **m** e absoluta **M** conhecidas, basta aplicar a equação do módulo de distância (Capítulo 5, item 5.6) para calcular a distância da estrela em parsecs.

A paralaxe espectroscópica nos permite calcular a distância de estrelas com precisão até cerca de 10 kpc (10 kiloparsecs), muito superior à da paralaxe trigonométrica, mas ainda insuficiente para cobrir todas as distâncias dentro de nossa Galáxia, que tem 30 kpc de diâmetro (KEPLER; SARAIVA, 2000). Acima desse valor, prefere-se o uso de outros métodos, como a relação período-luminosidade das estrelas Cefeidas, que será vista no último capítulo deste trabalho.

Outro uso importante do diagrama HR é a determinação de idades de aglomerados estelares (abertos e globulares). Isso nos permite, por exemplo, mapear a Galáxia e estudar sua evolução temporal. O processo para determinar a idade de um aglomerado, criado em 1955 por Allan Sandage, passa por construir seu diagrama HR e procurar identificar o ponto em que, no seu processo evolutivo, a estrela deixa a sequência principal (denominado *turnoff point*). Ver Figura 7.10.

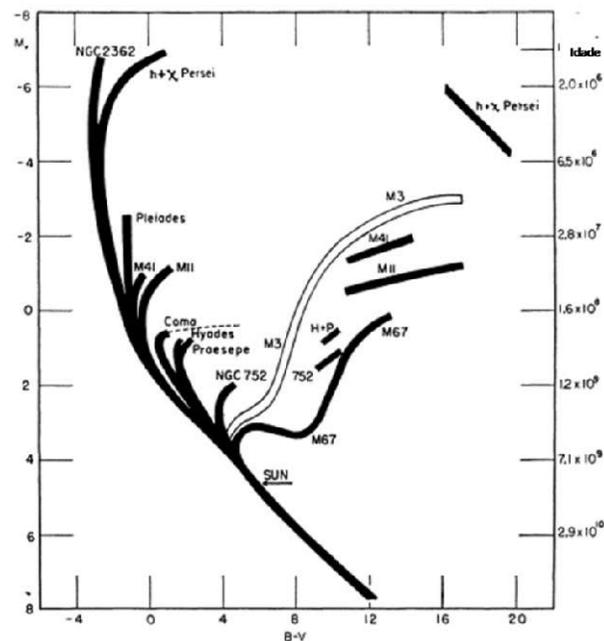


Figura 7.10 – Diagrama HR esquemático original de Allan Sandage indicando a idade de diversos aglomerados estelares. (Crédito: SANDAGE, 1956.)

A título de exemplo daquilo que pode ser feito em pesquisas nesse campo, na Figura 7.11 é visto o diagrama HR do aglomerado globular NGC 6642, feito no Observatório SOAR (Southern Astrophysical Research Telescope), no qual o Brasil tem participação e que se situa em Cerro Pachón, no Chile. Esta pesquisa foi feita por pesquisadores brasileiros e italianos (BARBUY et al., 2006); o diagrama indicou, entre outras conclusões, que o aglomerado se encontra a uma distância de cerca de 7.200 pc do Sol e a apenas 1.700 pc do centro da Via Láctea (o que significa que ele pertence ao bojo central da nossa Galáxia), e ainda que a sua idade é da ordem de 13,5 bilhões de anos – o que o coloca como um dos objetos mais antigos da Galáxia.

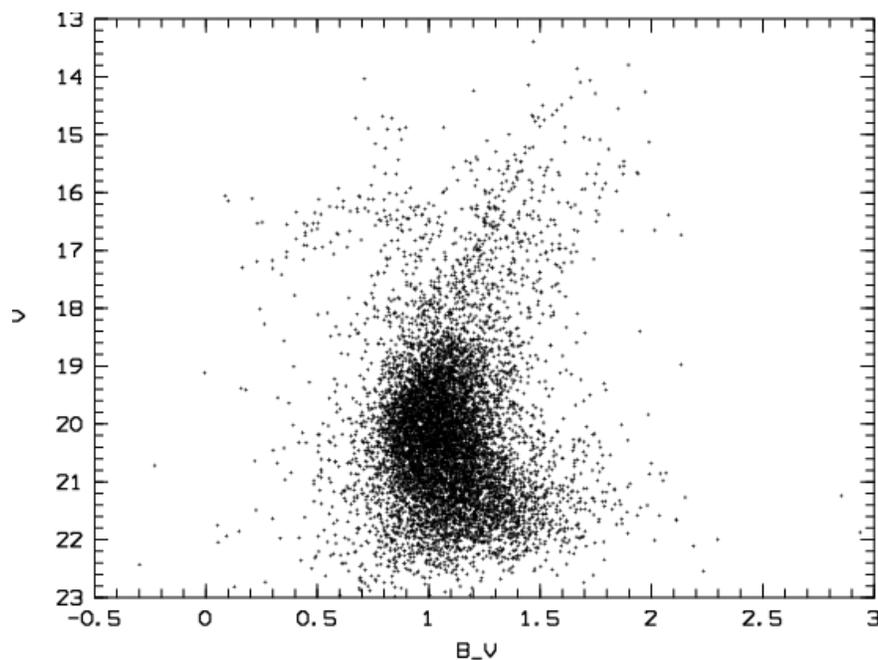


Figura 7.11 – Diagrama HR do aglomerado globular NGC 6642. (Crédito: BARBUY et al., 2006.)

Entre as inúmeras outras aplicações do diagrama HR estão a análise da evolução e da distribuição das populações estelares na Via Láctea e em outras galáxias, o estudo de estrelas variáveis, a análise das distribuições dos raios e das massas estelares e uma série infindável de outros usos, mas – talvez o mais importante – o estudo da evolução das estrelas (e em consequência da Via Láctea, das outras galáxias e do próprio Universo). Algumas dessas aplicações serão mencionadas nos próximos capítulos. Por ora, é suficiente esta primeira apresentação dessa fantástica ferramenta com que Ejnar Hertzsprung e Henry Norris Russell nos presentearam.

7.3 Atividades sugeridas (para professores)

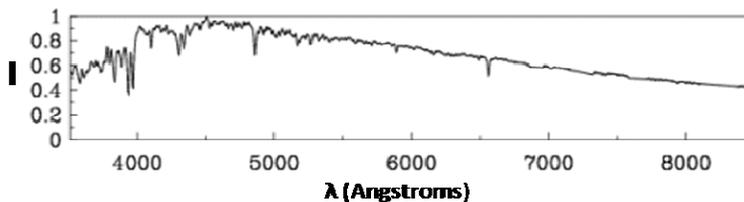
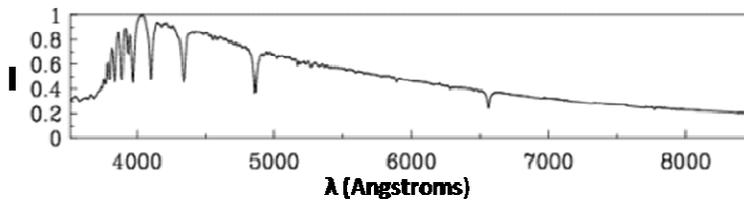
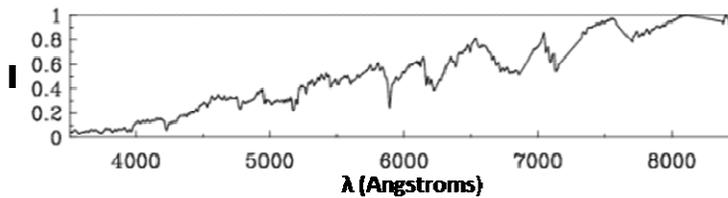
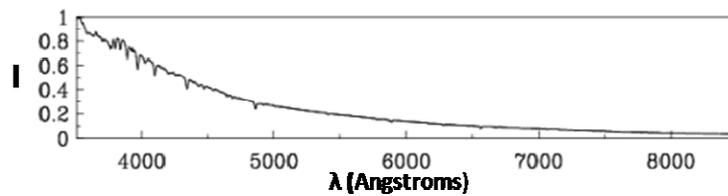
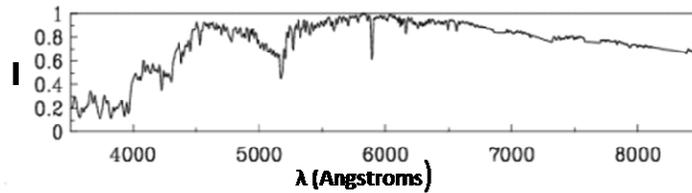
Questões sobre a classificação espectral:

- Na tabela abaixo, estão listadas as dez estrelas mais brilhantes que podemos observar no céu noturno, e mais o nosso Sol. Para cada estrela são dados: a magnitude absoluta (M), a magnitude aparente (V), o tipo espectral e o índice de cor (B-V).

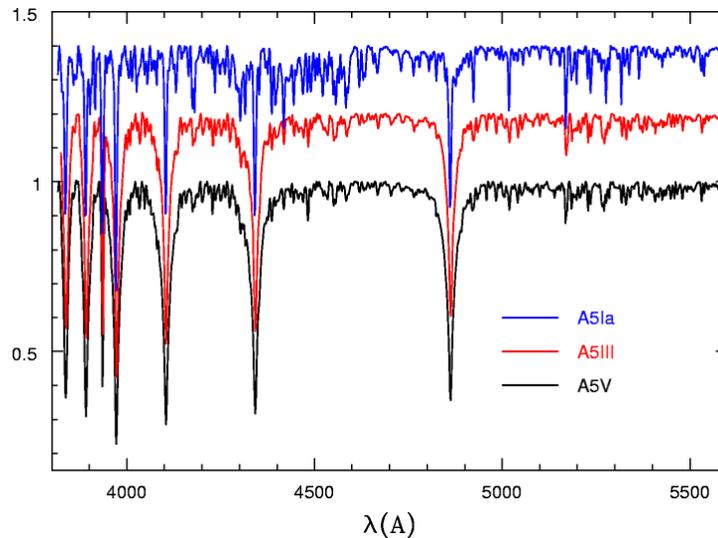
	Nome	M	V	Tipo espectral	(B-V)
.	Sol	+4,8	-26,72	G2 V	0,7
1	Sirius	+1,4	-1,46	A1 V	0,00
2	Canopus	-5,6	-0,72	F0 Ib	0,16
3	Alfa Centauri	+4,4	-0,27	G2 V	0,7
4	Arcturus	-0,4	-0,04	K2 III	1,23
5	Vega	+0,5	+0,03	A0 V	0,00
6	Capella	-0,5	+0,08	G2 III	0,79
7	Rigel	-7,2	+0,12	B8 Ia	-0,03
8	Procyon	+2,6	+0,38	F5 IV	0,41
9	Achernar	-2,7	+0,46	B5 IV	-0,18
10	Betelgeuse	-5,7	+0,50	M2 I	1,86

1. Liste essas estrelas em ordem crescente de temperatura.
2. Liste-as em ordem crescente de luminosidade.
3. Quais dentre elas são estrelas supergigantes?
4. Quais são gigantes? Quais as da sequência principal?
5. Qual a estrela mais semelhante ao nosso Sol?

- (Adaptado de Spectral Classes Lab, University of New Mexico): Abaixo estão cinco gráficos com trechos de espectros de estrelas, vistos na mesma escala da Figura 7.1 deste capítulo. Usando essa figura como referência, localize o tipo espectral mais próximo de cada gráfico e classifique cada estrela segundo o sistema de Harvard.



- (Adaptado de RICHMOND, 2013.) Na figura abaixo, são vistas três estrelas cujas classes espectrais estão indicadas. Uma delas é uma supergigante. Qual delas? Você poderia chegar à mesma conclusão sem olhar as legendas? De que forma?



Questões sobre o diagrama HR:

- Este tópico contém várias questões conceituais interessantes. Sugerimos escolher algumas das listadas abaixo, conforme o tempo disponível, para discussões em classe:
 - Em uma amostra estatisticamente significativa das estrelas da Galáxia, a sequência principal costuma conter cerca de 90% da população total de estrelas. Como se explicaria isso, num contexto estatístico? Por que razões vemos uma proporção tão grande de estrelas na sequência principal?
 - O que aconteceria com o diagrama da Figura 7.5, se tivéssemos escolhido representar as mil estrelas mais brilhantes do céu, em vez de apenas cem?
 - Uma hipótese que poderíamos imaginar ao observar o diagrama da Figura 7.6 é que as estrelas menores e frias são muito mais abundantes que as quentes e massivas. Qual a sua opinião – isso seria correto ou não?
- Uma excelente simulação do diagrama HR feita pelo NAAP (Nebraska Astronomy Applet Project) pode ser encontrada no link <http://astro.unl.edu/naap/hr/hr.html>. Nela, o cursor (o “x” vermelho) representa uma estrela qualquer, cuja temperatura e luminosidade são mostradas no painel “Cursor Properties”. Arraste o cursor para várias posições do diagrama HR e verifique o que acontece com o tamanho, a cor, a temperatura e a luminosidade da estrela em cada posição. Você pode também variar as legendas dos dois eixos e habilitar mais estrelas no diagrama HR. Boa diversão!

- A tabela a seguir relaciona cinquenta das estrelas mais brilhantes que podemos observar no céu. Para cada estrela, são dados o nome, a magnitude absoluta (M_V), a temperatura efetiva (T) e o Tipo espectral.

Estrela	M_V	T (K)	Tipo	Estrela	M_V	T (K)	Tipo
1. Sol	4,8	5840	G2	26. Sirius A	1,4	9620	A1
2. Canopus	-5,6	7400	F0	27. Arcturus	-0,4	4590	K2
3. Alfa Centauri A	4,3	5840	G2	28. Vega	0,5	9900	A0
4. Capella	-0,5	5150	G8	29. Rigel	-7,2	12140	B8
5. Procyon A	2,6	6580	F5	30. Betelgeuse	-5,7	3200	M2
6. Achernar	-2,7	20500	B3	31. Saiph	-6,1	26500	B1
7. Altair	2,2	8060	A7	32. Aldebaran	-0,8	4130	K5
8. Spica	-3,4	25500	B1	33. Antares	-5,2	3340	M1
9. Fomalhaut	2,0	9060	A3	34. Pollux	1,0	4900	K0
10. Deneb	-7,2	9340	A2	35. Beta Crucis	-3,4	28000	B0
11. Regulus	-0,8	13260	B7	36. Alfa Crucis A	-4,0	28000	B0
12. Adhara	-4	23000	B2	37. Shaula	-3,4	25500	B1
13. Bellatrix	-2,7	23000	B2	38. Castor	1,2	9620	A1
14. Gama Crucis	-0,5	3750	M3	39. Beta Centauri	-5,1	25500	B1
15. Alfa Centauri B	5,8	4730	K1	40. Al Na'ir	-1,1	15550	B5
16. Miaplacidus	-2,0	9300	A0	41. Elnath	-1,6	12400	B7
17. Alnilam	-6,2	26950	B0	42. Mirfak	-4,6	7700	F5
18. Alnitak	-5,9	33600	O9	43. Dubhe	0,2	4900	K0
19. Alioth	0,4	9900	A0	44. Alfa Pavonis	-2,3	20500	B3
20. Kaus Australis	-1,4	11000	B9	45. Theta Scorpis	-2,7	7400	F0
21. Atria	-3,6	4590	K2	46. Alkaid	-1,7	20500	B3
22. Alfa Crucis B	-3,3	20500	B3	47. Avior	-4,6	4900	K0
23. Mintaka	-5,4	31000	O9	48. Alhena	0,0	9900	A0
24. Menkalinan	0,6	9340	A2	49. Polaris	-4,6	6100	F8
25. Mirzam	-4,8	25500	B1	50. Delta Velorum	0,6	9900	A0

Com base nas propriedades listadas na tabela:

1. Construir o diagrama HR dessas estrelas, usando as magnitudes absolutas e as temperaturas dadas na tabela. Não é necessária grande precisão, mas sugerimos o uso de papel milimetrado ou quadriculado para facilitar a construção do gráfico. Identificar as estrelas no diagrama pelos seus números de ordem ou pelos seus nomes.
2. Identifique três estrelas azuis ou azuladas, três amarelas e três vermelhas.
3. As classes de luminosidade não estão listadas na tabela. Porém, seria possível, com base no seu diagrama, identificar quais são as estrelas da sequência principal e quais são as gigantes ou supergigantes? De que forma?
4. Calcule a luminosidade de Antares e de Rigel em relação ao Sol.
5. Sabendo-se que as magnitudes aparentes de Spica e Vega são respectivamente de 1,0 e 0,0, calcule as suas distâncias ao Sol.
6. Mintaka, Alnilam e Alnitak são as “Três Marias”. Suas magnitudes aparentes são 2,25, 1,68 e 1,74 respectivamente. Qual a mais próxima da Terra?
7. Quais as estrelas da tabela que possuem linhas de HI mais fortes? Por quê?

Exercícios CLEA

Caso o professor deseje aprofundar de fato todos os conhecimentos vistos até aqui, recomendamos vivamente realizar com seus alunos duas “práticas virtuais de laboratório” do projeto CLEA (Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy). Trata-se de simulações extremamente realistas e didáticas desenvolvidas pelo Departamento de Física do Gettysburg College, dos Estados Unidos, com apoio da National Science Foundation e da NASA. Eles têm sido usados em todo o mundo para treinamento de alunos de graduação e mesmo pós-graduação em Astronomia, bem como no ensino não-formal regular, e estão plenamente ao alcance dos alunos do Ensino Médio.

Os alunos poderão obter gratuitamente pela internet os softwares para realizar os exercícios, as instruções de instalação e operação e um manual explicativo contendo as tarefas para cada prática (há também um manual para o professor). Realizando essas práticas, os alunos aprenderão as técnicas básicas de fotometria e espectroscopia, a reconhecer os distintos tipos de espectros estelares, a construir diagramas HR e a usá-los para aplicações semelhantes às que são usadas em pesquisas astronômicas reais, como o cálculo da distância de um aglomerado estelar.

O autor tem utilizado os softwares do projeto CLEA com seus próprios alunos desde 2005 em cursos semestrais do ensino não-formal, ministrados a centenas de interessados que trabalham profissionalmente em diversas áreas distintas, porém têm em comum o interesse pela Astronomia Observacional. Os resultados têm sido

consistentemente excelentes, tanto do ponto de vista motivacional como de absorção dos conceitos vistos nas aulas expositivas. Além disso, as práticas CLEA são muito úteis para preparar os alunos para uma fase seguinte deste nosso projeto de ensino, que é a operação real de um telescópio automatizado com seus respectivos detectores para a realização de projetos reais em Astronomia Observacional. Em suma, trata-se de “hands-on astronomy” da melhor qualidade!

Os programas CLEA foram desenhados para ambiente Windows e estão disponíveis no link <<http://www3.gettysburg.edu/~marschal/clea/cleahome.html>>. Serão necessários computadores com plataformas Windows XP ou posterior para executá-los. O website do projeto disponibiliza dezesseis projetos no total. Sugerimos baixar o “pacote” VIREO (Virtual Educational Observatory), que reúne sete interessantes projetos sobre Astrofísica Estelar. Dentre eles, recomendamos especialmente dois projetos:

Photoelectric Photometry of the Pleiades: este programa coloca o aluno no controle de um telescópio virtual robótico, no qual ele poderá executar medições fotométricas das magnitudes de dezenas de estrelas do aglomerado estelar das Plêiades, usando um fotômetro fotoelétrico dotado de filtros U, B e V. A partir das suas próprias medidas, o aluno poderá construir um diagrama HR para determinar a distância do aglomerado.

The Classification of Stellar Spectra: este programa permite inicialmente ao aluno se familiarizar com o processo de classificação de espectros estelares e com as respectivas linhas espectrais mais importantes em cada tipo. Numa segunda parte, ele coloca o aluno no controle de um telescópio e de um espectroscópio simulado, com os quais ele poderá fazer a aquisição dos espectros de até 200 estrelas e classificá-los. A partir dos espectros e das magnitudes medidas, ele aprenderá a usar a técnica da paralaxe espectroscópica para derivar a distância de várias estrelas.

Cada um desses dois exercícios terá tipicamente a duração de cerca de quatro horas. Em nossa própria experiência, os resultados mais produtivos do ponto de vista didático são obtidos quando cada exercício é dividido em duas partes distintas com duração de cerca de duas horas cada. Recomenda-se também que os alunos executem cada exercício em grupos de quatro a cinco membros, o que, além de mais prazeroso e de estimular as discussões, dará margem a que cada um possa exercer sua criatividade e seu bom senso, o que será essencial para que os exercícios sejam completados com sucesso.

A orientação do professor será importante para que os alunos aproveitem ao máximo as muitas possibilidades desses dois exercícios. Para facilitar seu trabalho, estamos disponibilizando nos Anexos, ao fim deste trabalho, versões traduzidas para o português de ambos os exercícios, divididos em duas partes cada. Todas foram testadas ao longo de muitos anos com alunos de nível equivalente ao Ensino Médio e/ou Superior. Boa sorte!

Referências bibliográficas para o Capítulo 7

BARBUY, B. et al. SOAR BVI photometry of the metal-poor bulge globular cluster NGC 6642. *Astronomy and Astrophysics*, v. 449:3, p. 1019-24, 2006. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2006A%26A...449.1019B>>. Acesso em: 13 de junho de 2017.

CANNON, A.J. The Henry Draper Memorial. *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, v. 9, p. 203-15, 1915. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1915JRASC...9..203C>>. Acesso em: 6 de junho de 2017.

CORTIE, A.L. Sir Norman Lockyer, 1836-1920. *Astrophysical Journal*, v. 53, p. 233-48, 1921. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1921ApJ....53..233C>>. Acesso em: 7 de junho de 2017.

COX, A.N. (ed.), *Allen's astrophysical quantities*. Section 15.2 (Spectral classification), p. 383-4. New York: Springer-Verlag, 1999.

FROST, E.B. Hermann Carl Vogel. *Astrophysical Journal*, v. 27, p. 1-11, 1908. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1908ApJ....27....1F>>. Acesso em: 7 de junho de 2017.

GINGERICH, O. The critical importance of Russell's diagram. arXiv:1302.0862v1, 2013. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1302.0862v1>>. Acesso em: 12 de junho de 2017.

GRAY, R.O.; CORBALLY, C.J. *Stellar spectral classification*. New Jersey: Princeton University Press, p. 1-31, 2009.

HERTZSPRUNG, E. Über die Sterne der Unterabteilungen c und ac nach der Spektralklassifikation von Antonia C. Maury. *Astronomische Nachrichten*, v. 179:24, p. 373, 1908. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1909AN....179..373H>>. Acesso em: 12 de junho de 2017.

HERTZSPRUNG, E. Über die Verwendung Photographischer Effektiver Wellenlaengen zur Bestimmung von Farbaequivalenten. *Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam*, v. 22:1, 1911.

HOFFLEIT, D. Pioneering women in the spectral classification of stars. *Physics in Perspective*, v. 4, issue 4, p. 370-98, 2002. Disponível em: <<http://web.science.mq.edu.au/~orsola/MQTeaching/ASTR377/Hoffleit.pdf>>. Acesso em: 8 de junho de 2017.

JACOBY, G.H.; HUNTER, D.A.; CHRISTIAN, C.A. A library of stellar spectra. *Astrophysical Journal Supplement Series*, v. 56, p. 257-81, 1984. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1984ApJS...56..257J>>. Acesso em: 6 de junho de 2017.

JASCHEK, C.; JASCHEK, M. *The classification of stars*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

KALER, J.B. *Stars and their spectra*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 60-83, 2nd ed., 1997.

KALIRAI, J.S.; RICHER, H.B. Star clusters as laboratories for stellar and dynamical evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v. 368, p. 755-82, 2010. Disponível em: <<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/368/1913/755.article-info>>. Acesso em: 13 de junho de 2017.

KEENAN, P. The MK classification and its calibration. In: *Calibration of Fundamental Stellar Quantities. Proceedings of the IAU Symposium, Como, Italy, May 24-29, 1984*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., p. 121-35, 1985. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1985IAUS..111..121K>>. Acesso em: 11 de junho de 2017.

KEPLER, S.O.; SARAIVA, M.F.O. *Astronomia e Astrofísica*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1^a ed., p. 441, 2000. Uma versão digital, atualizada em 2013, está disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/index.htm>>. Acesso em: 14 de junho de 2017.

KIRKPATRICK, J.D. et al. Dwarfs cooler than "M": the definition of spectral type "L" using discoveries from the 2-Micron All-Sky Survey (2MASS). *Astrophysical Journal*, v. 519, p. 802-33, 1999. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1999ApJ...519..802K>>. Acesso em: 9 de junho de 2017.

LEBLANC, F. *An introduction to Stellar Astrophysics*. London: John Wiley and Sons, Ltd., p. 25, 2010.

MAURY, A.; PICKERING, E.C. Spectra of bright stars photographed with the 11-inch Draper Telescope as part of the Henry Draper Memorial. *Annals of Harvard College Observatory*, v. 28, p. 1-128, 1897. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1897AnHar..28....1M>>. Acesso em: 8 de junho de 2017.

MCCARTHY, M.F. Fr. Secchi and stellar spectra. *Popular Astronomy*, v. 58, p. 153-68, 1950. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1950PA.....58..153M>>. Acesso em: 5 de junho de 2017.

ONDRA, L. The first Hertzsprung-Russell diagram. 2000. Disponível em: <<http://www.leosondra.cz/en/first-hr-diagram/>>. Acesso em: 12 de junho de 2017.

PAYNE-GAPOSCHKIN, C. The dyer's hand: an autobiography, 1979. In: HARAMUNDANIS, K. (ed.), *Cecilia Payne-Gaposchkin*. Cambridge: Cambridge University Press, 2nd ed., p. 144-72, 1996.

PICKERING, E.C. The Draper Catalogue of Stellar Spectra. *Annals of the Astronomical Observatory of Harvard College*, v. 27. Cambridge: John Wilson and Son, 1890. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1890AnHar..27....1P>>. Acesso em: 6 de junho de 2017.

POWELL, R. An atlas of the Universe. Julho de 2006. Disponível em: <<http://www.atlasoftheuniverse.com/index.html>>. Acesso em: 13 de junho de 2017.

RICHMOND, M. How can we distinguish giants from dwarfs? Notas de aula. Physics 301, Rochester Institute of Technology, 2013. Disponível em: <<http://spiff.rit.edu/richmond/asras/giant/giant.html>>. Acesso em: 13 de junho de 2017.

RIGGE, W.F. Father Angelo Secchi. *Popular Astronomy*, v. 26, p. 593, 1918. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PA.....26..589R>>. Acesso em: 5 de junho de 2017.

ROSENBERG, H. Über den Zusammenhang von Helligkeit und Spektraltypus in den Plejaden. *Astronomische Nachrichten*, v. 186, n. 5, p. 71, 1910. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1910AN....186...71R>>. Acesso em: 9 de junho de 2017.

RUSSELL, H.N. Relations between the spectra and other characteristics of the stars. *Popular Astronomy*, v. 22, p. 275-94, 1914. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1914PA.....22..275R>>. Acesso em: 8 de junho de 2017.

SANDAGE, A. The systematics of color-magnitude diagrams and stellar evolution. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, v. 68, n. 405, p. 498, 1956. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1956PASP...68..498S>>. Acesso em: 9 de junho de 2017.

STROBEL, N. Astronomy notes. 2013. Disponível em: <<http://www.astronomynotes.com/>>. Acesso em: 12 de junho de 2017.

THEIS, C. et al. An expelled Jewish astronomer: Hans Rosenberg. *Astronomische Gesellschaft Abstract Series*, n. 12, p. 127, 1996. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1996AGAb...12..127T>>. Acesso em: 12 de junho de 2017.

%%%%%%%%%